

順応型 Shifted Integration 法による大規模骨組構造の耐震強度解析

Earthquake Resistance Analysis of a Large-Scale Framed Structure by Using Adaptively Shifted Integration Technique

都 井 裕*・磯 部 大吾郎*

Yutaka TOI and Daigoro ISOBE

1. 序

著者らは、大規模骨組構造の非線形有限要素解析を合理化し、計算効率を極限まで高めることを目的に、Shifted Integration 法あるいは順応型 Shifted Integration 法と称する一種の smart algorithm を開発し、塑性崩壊問題、座屈崩壊問題、動的崩壊問題などに対する数値例を通じ、本手法が変位型有限要素法の枠内において最も合理的かつ効率的な計算方法であることを明らかにしてきた^{1)~4)}。実際の大規模骨組構造の塑性崩壊問題および座屈崩壊問題に対しては、Shifted Integration 法に基づく線形チモシェンコはり要素による耐震強度解析をすでに実施しているが⁵⁾、同じ問題に対し順応型 Shifted Integration 法に基づく3次はり要素を用いることにより、一層の精度向上および効率化が達成されたのでここに報告したい。

2. 順応型 Shifted Integration 法

骨組構造解析において部材が十分に細長く、せん断変形の影響が無視できる場合には通常、Bernoulli-Euler の仮定に基づく3次はり要素が用いられる。この要素を用いる場合の順応型 Shifted Integration 法による塑性崩壊解析および座屈崩壊解析の概略は以下のとおりである^{2),3)}。

すなわち、各部材を1要素近似し、増分解析をスタートする。この際、要素剛性マトリックス評価のための数値積分点は2つのガウス積分点に配置される。1要素近似によっても線形弾性解の精度は確保される。

各要素において2方向（強軸および弱軸方向）の曲げモーメントの要素内分布を監視し、要素内で一定値をとる軸力およびねじりモーメントの影響を考慮した相当断面力値により、要素内における（どちらかの要素端）一般化塑

性ヒンジの発生を判定する。ヒンジの発生が宣告された要素については、ひずみエネルギー近似の等価性に基づき誘導された関係式¹⁾を用いて、塑性ヒンジが厳密に要素端に発生するように、数値積分点の位置をシフトして計算を続ける。

座屈崩壊解析においてはさらに、既存の座屈相関式により、断面力値が部材の座屈レベルの80%の値に到達したと判定された部材については、これを2要素あるいは4要素に自動的に細分化する。1部材1要素のモデル化では、座屈変形により部材中央部などに発生する塑性ヒンジをモデル化することが不可能なためである。また、部材の座屈荷重値は2要素近似でほぼ精度よく捉えることができるが、座屈後の変形挙動に対しては不十分な場合があるため³⁾、4要素近似の option も用意されている。

すなわち本解析手法は、要素の弾塑性性状に応じ常に最適なモデリングとなるように順応的に数値積分点位置をシフトする手法であり、微小変形下の塑性崩壊解析においては、1部材1要素のモデル化で解析が終了するため、最高度の計算効率が達成されており、既存プログラムへのインプリメンテーションもきわめて容易である。また座屈崩壊解析においても、細分化される部材は自動判定された座屈部材に限定されており、計算コストの増大は最小限度に抑えられている。

3. 大規模骨組構造の耐震強度解析

3.1 解析モデル

解析対象とした建築構造物を図1に示す。本構造物は地下1階、地上8階の建造物であり、目下、東京湾岸において東京国際展示場・管理会議棟（コングレスタワー）として建設途上にある。その形状の概略は以下のとおりである。すなわち、エレベータ・シャフト（9m×9m）の4隅に柱を建て組柱とし、これを45m スパンで4本設けている。

*東京大学生産技術研究所 第2部

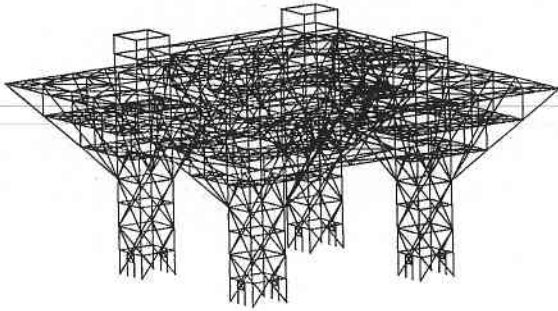


図 1 解析モデル

これら 4 本のコラムが、28.8 m 上方（6 階より上）に位置し、組柱から斜め 45° 方向に跳ね出した逆 4 角錐の建造物を支えている。平面形は 8 階床部分で最大であり、90 m × 90 m の正方形となっている。

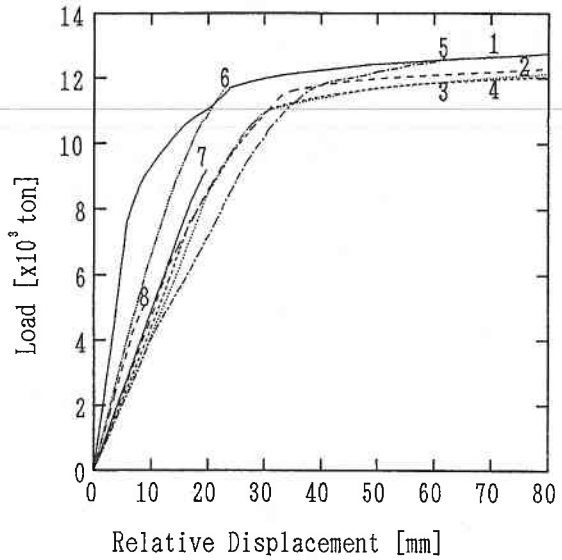
構造形式は 2 階の柱より上部が鉄骨造ブレース付きラーメン構造、2 階の床梁より下部が鉄骨鉄筋コンクリート造のラーメン構造および耐震壁付きラーメン構造である。柱断面鉄骨は遠心力铸造鋼管（800 φ）および溶接箱型鋼管であり、最大板厚は 70 mm である。大梁断面鉄骨は溶接組立 H 型钢であり、梁せいは 2200 ~ 700 mm、最大板厚は 38 mm である。また、ブレース材は溶接箱型鋼管（500 ~ 400 角）であり、最大板厚は 25 mm である。鋼材材質は、SCW490-CF および SM490A である。

1 部材 1 有限要素でモデル化した解析モデルにおける総要素数は 1630、総節点数は 546 である。座屈崩壊解析の場合には、計算過程において座屈すると判定された部材が 2 要素あるいは 4 要素に細分化されるため、要素数および節点数が増加する。仮定した材料定数は、 $E=2.1 \times 10^4$ [kgf/mm²]、 $\nu=0.3$ 、 $\sigma_y=33.0$ [kgf/mm²] であり、ひずみ硬化は無視した。

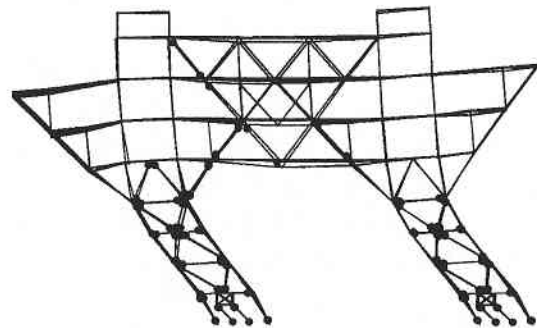
境界条件として構造下端の全自由度を拘束し、自重を負荷した状態を初期条件として静的地震力（水平荷重）を増分的に加え、塑性崩壊解析（微小変形）および座屈崩壊解析（有限変形）を実施した。1 次設計用水平荷重の鉛直方向分布を表 1 に示す。

3.2 塑性崩壊解析

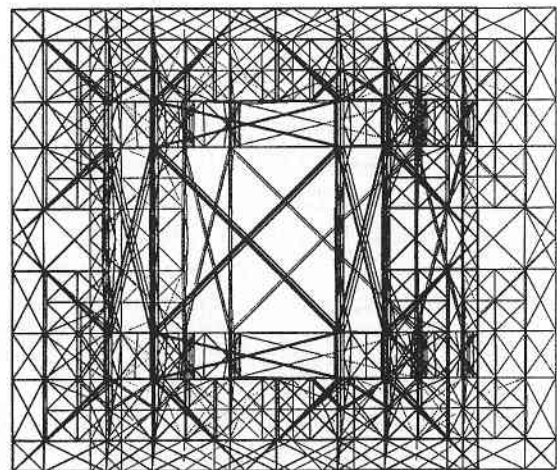
図 2 は微小変形下の塑性崩壊解析結果である。図 2 (a) に水平せん断力・層間変位関係を示す。図中の番号は層番号である。下層部すなわち柱脚部分の崩壊により全体崩壊に至っていることがわかる。また、この計算結果より、本解析モデルの最大荷重係数は 2.46、すなわち建築基準法施行令に基づく 1 次設計用せん断力の 2.46 倍の終局耐力を有することが判明した。図 2 (b) は側面変形および塑性ヒンジの発生状況を表わしており、図 2 (c) は上方から見た変形図で



(a) 水平せん断力・層間変位関係



(b) 側面変形図および塑性ヒンジ発生状況（荷重係数=2.46）

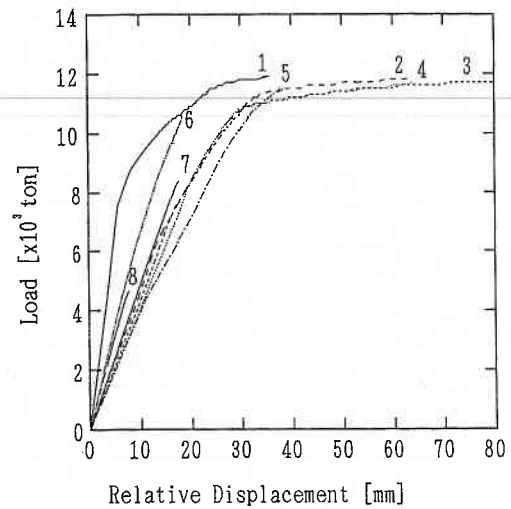


(c) 上面変形図（荷重係数=2.46）

図 2 塑性崩壊解析結果

表 1 設計用水平荷重分布

層	荷重 (ton)
最上層	0.0
第 8 層	2061.7
第 7 層	1668.8
第 6 層	983.0
第 5 層	411.0
第 4 層	54.5
第 3 層	39.0
第 2 層	37.1
第 1 層	40.7
総和	5295.8



(a)水平せん断力・層間変位関係

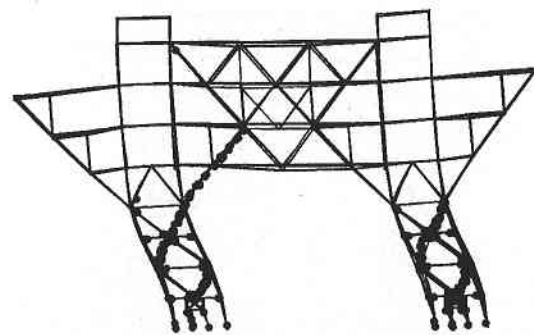
ある。変位は30倍に拡大して作画されている。最初に第5層のブレースが塑性化し、続いて柱脚部の塑性崩壊が起こり、第1層から第4層の柱脚部のほとんどの部材が塑性化して全体崩壊に至る解析結果が得られた。本解析結果は、文献5)の塑性崩壊解析結果と総体的に良好に一致している。SUN/SPARCstation 10による計算時間は、3時間8分(86増分ステップ)であった。

3.3 座屈崩壊解析

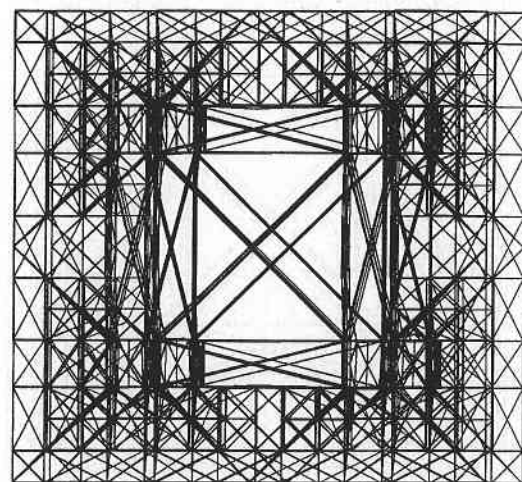
図3と図4は有限変形下の座屈崩壊解析結果であり、座屈と判定された部材がそれぞれ4要素および2要素に細分化されている。

図3(a)は水平せん断力・層間変位関係である。微小変形解析の場合と同様に、柱脚部分の崩壊により全体崩壊に至っていることがわかる。この解析より得られた本解析モデルの最大荷重係数は2.25である。すなわち、座屈を考慮したことによる強度低下は10%未満である。図3(b)と図3(c)は、側面および上面変形図であり、図3(b)には塑性ヒンジ発生状況も合せて示されている。第5層のブレースの圧縮力による座屈崩壊に始まり、これに続く柱脚部部材の塑性崩壊および座屈崩壊が観察された。最終段階では、第3層から第6層にわたるブレースが主に座屈したことがわかる。この解析結果も、文献5)の座屈崩壊解析結果と総体的に良好に一致しており、本構造物は十分に大きな終局耐力を有する粘り強い構造体であることが確認された。本解析では、要素数および節点数は最終的にそれぞれ1924および840にまで増加しており、SUN/SPARCstation 10における計算時間は、13時間19分(150増分ステップ)であった。

図4は、座屈部材を2要素に細分化した場合の解析結果である。図3の解析結果と比較すると、最大荷重係数は等



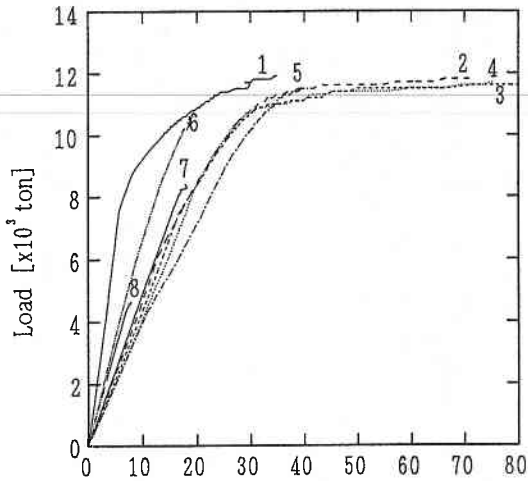
(b)側面変形図および塑性ヒンジ発生状況(荷重係数=2.25)



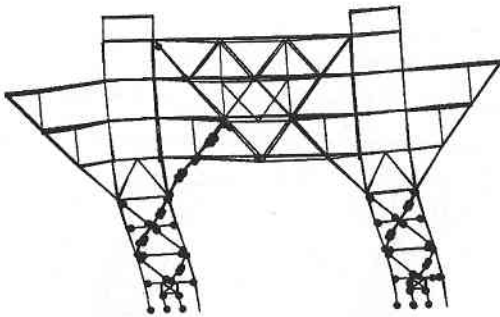
(c)上面変形図(荷重係数=2.34)

図3 座屈崩壊解析結果(4要素細分化)

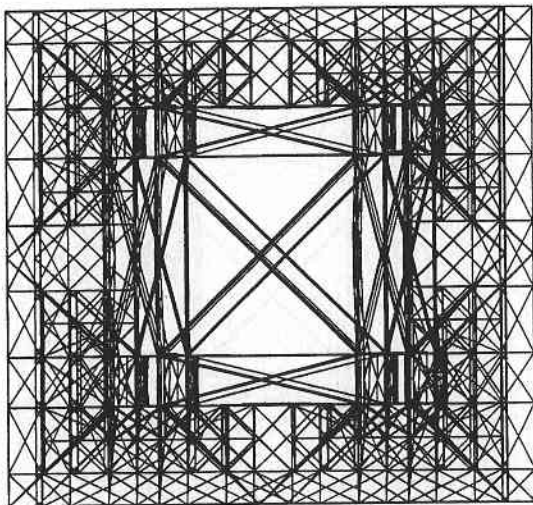
研 究 速 報



(a)水平せん断力・層間変位関係



(b)側面変形図および塑性ヒンジ発生状況 (荷重係数=2.25)



(c)上面変形図 (荷重係数=2.25)

図4 座屈崩壊解析結果 (2要素細分化)

しく、水平せん断力・層間変位関係、変形図、塑性ヒンジの発生状況も良好に対応している。すなわち、座屈部材数の全部材数に対する割合が必ずしも大きくない大規模骨組構造に対しては、2要素程度の細分化でも実用上ほぼ十分な精度で最終耐力を算定できると判断される。なお、本解析においては、最終的に101の部材で座屈が宣告され、要素数は1731、総節点数は647まで増加し、SUN/SPARC-station 10における計算時間は、9時間17分(150増分ステップ)であった。

4. 結 言

本報告では、順応型 Shifted Integration 法に基づく3次はり要素を用いて、実際の大規模骨組構造の静的地震力による塑性崩壊挙動および座屈崩壊挙動の有限要素解析を行い、本手法が計算効率および計算精度において十分な実用性を有することを確認した。すなわち、1部材1要素のモデリングで解析をスタートできるため、CADデータの転用が容易であり、標準的なEWSを用いても数時間から半日程度で計算が終了する。また本手法は、既存の骨組解析用有限要素解析プログラムへのインプリメンテーションもきわめて容易である。

なお、本解析における入力データは株式会社クボタ・素形材技術部の原田宏一氏より提供を受けた。ここに記して謝意を表する。
(1994年7月6日受理)

参 考 文 献

- 1) Y. Toi: Shifted Integration Technique in One-Dimensional Plastic Collapse Analysis Using Linear and Cubic Finite Elements, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 31, (1991), 1537-1552.
- 2) Y. Toi and D. Isobe: Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 36, (1993), 2323-2339.
- 3) 都井, 磯部: 順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の座屈崩壊挙動の有限要素解析, 日本造船学会論文集, 第174号, (1993), 469-477.
- 4) 都井, 磯部: 順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の動的崩壊挙動の有限要素解析, 日本造船学会論文集, 第175号, (1994), 299-306.
- 5) 都井, 原田, 弓削: Shifted Integration 法に基づく線形有限要素による空間骨組構造の最終耐力解析, 生産研究, 第44巻, 第3号, (1992), 142-145.